



## Ефективність використання машин в землеробстві Efficiency of use machines in agriculture

УДК 629.01

### Вибір раціонального режиму роботи МТА на основі аналізу еліпсоїда функціонування

М.Л. Шуляк

*Харківський національний технічний університет сільського господарства ім.  
П.Василенка (м.. Харків, Україна), mihail\_shulyak@mail.ru*

Необхідність проведення оцінки функціонування МТА є однією з важливих задач сучасної науки. З великою ймовірністю можливо стверджувати що, як тягова концепція трактора, так і методи оцінки тягово-динамічних і економічних властивостей потребують змін в умовах сучасного тракторобудування. Особливу актуальність ці питання набувають при оцінці тягових параметрів закордонних тракторів великої енергонасиченості. Звичайні тягові випробування не дають можливості оцінити потенційні можливості тракторів бо реалізувати потужність двигуна через рушії енергонасиченого трактора дуже важко. Сталий режим руху супроводжується появою поздовжніх лінійних прискорень, що викликають коливання лінійної швидкості машини, щодо свого середнього значення. Запропоновано розглянути сталий рух МТА, як послідовність розгонів та сповільнень. Аналіз напрямку вектора повного прискорення дозволяє стверджувати, що будь-які відхилення цього вектора від осей ординат і апікат викликають шкідливу роботу і втрату енергії. Залежно від знака проекції, робота вздовж напрямку руху є додатковою втратою енергії, і в той же час умовою динамічної рівноваги. Умовою динамічної рівноваги є рівність по модулю від'ємних і додатних проекцій вектора на вісь абсцис. Для вибору оптимального режиму роботи МТА необхідно оцінювати динамічні втрати при сталому русі, що виникають при коливанні дійсної швидкості руху. В статті наведений аналіз напрямку вектора повного прискорення МТА та встановлено, що будь-які відхилення цього вектора від осей ординат і апікат викликають втрату енергії. Запропоновано метод аналізу режимів роботи, що спирається на оцінці об'єму області функціонування та відносної частоти розподілу проекцій прискорення стосовно ядра поверхні другого порядку. Запропонований принцип аналізу роботи МТА дозволить швидко визначити оптимальний режим та запропонувати заходи спрямовані на подальше зниження втрат енергії.

**Ключові слова:** прискорення трактора, тягово-динамічні властивості, експериментальні дослідження, вектор прискорення.

**Актуальність задачі** В світовій тракторній енергетиці чітко відстежується тенденція підвищення енергонасиченості тракторів, це викликає необхідність застосування нових підходів до вибору раціональних режимів їх функціонування. Також багато питань викликає адаптація енергонасичених тракторів до технологій виробництва сільськогосподарської продукції.

**Постановка проблеми.** Основна проблема, що виникає при застосуванні енергонасичених тракторів, як вітчизняного так і імпортного виробництва, складність вибору режиму роботи МТА та його комплектація. Ця проблема викликана відсутністю необхідної інформації для реалізації класичних методик.

З великою ймовірністю можна стверджувати що, як тягова концепція трактора, так і методи

оцінки тягово-динамічних і економічних властивостей потребують змін в умовах сучасного тракторобудування. Особливу актуальність ці питання набувають при оцінці тягових параметрів закордонних тракторів великої енергонасиченості. Звичайні тягові випробування не дають можливості оцінити потенційні можливості тракторів бо реалізувати потужність двигуна через рушії енергонасиченого трактора неможливо.

Тому, останнім часом набувають все більш широке застосування експрес-методики засновані на динамічних параметрах, це дозволяє більш повно оцінити роботу МТА та встановити напрямки її покращення.

Проте їх застосування в багатьох випадках не дозволяє застосувати класичну методику вибору режиму роботи агрегату, що в свою чергу

перекреслює багаторічний досвід. Тому необхідно знайти алгоритм використання експрес-методик з урахуванням класичного способу вибору режиму.

**Мета роботи.** Розробити методику вибору раціонального режиму функціонування МТА на основі вектора повного прискорення.

**Аналіз публікацій.** Для вирішення завдання – оцінки ефективності режиму роботи агрегату – побудуємо в інерційній системі координат частковий фрагмент усталеного руху МТА (рис. 1), що характеризується годографом вектора повного прискорення [1].

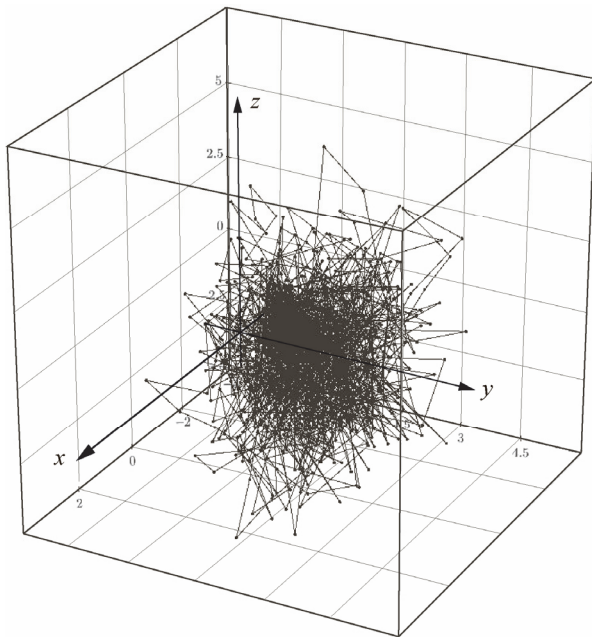


Рис. 1 Частковий фрагмент усталеного руху МТА, що характеризується годографом.

Годограф вектора повного прискорення показує послідовність зміни величини і положення векторів. При аналізі фрагменту сталого руху можна стверджувати, що побудовані вектори задають область функціонування МТА, збільшення об'єму якої характеризує приріст енергетичних втрат.

Виходячи з аналізу серії експериментів встановлено, що кожний окремий дослід дозволяє побудувати область функціонування і встановити додаткові енергетичні витрати по запропонованій в роботі [2] методиці. Проте обчислення отриманого об'єму неможливе без рівняння поверхні, що характеризує область функціонування. Попередній аналіз дозволяє стверджувати, що побудовані області можливо описати поверхнею другого порядку.

Спроекуємо радіус-вектори часткового фрагменту усталеного руху МТА на площину XY (рис. 2).

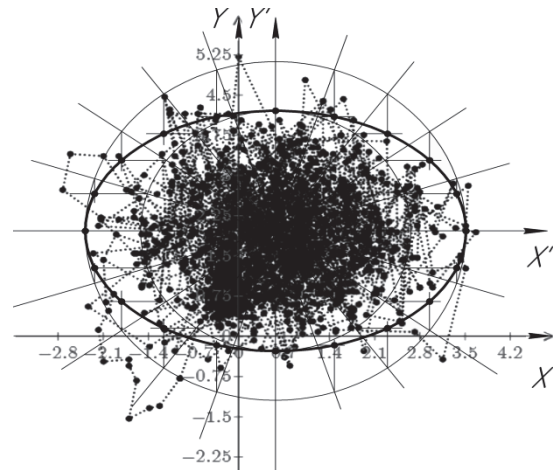


Рис. 2. Фрагменту усталеного руху МТА, апроксимований поверхнею другого порядку

Для подальшого переходу до тривимірного простору запишемо канонічне рівняння поверхні другого порядку (еліпсоїда) [3]:

$$\frac{(x - M_x)^2}{(a_{x\max} - M_x)^2} + \frac{(y - M_y)^2}{(a_{y\max} - M_y)^2} + \frac{(z - M_z)^2}{(a_{z\max} - M_z)^2} = 1, (1)$$

де  $a_{i\max}$  – максимальне значення проєкцій вектора повного прискорення на вісь апікат знаходиться, по значенню середньоквадратичного відхилення вибірки  $a_{i\max} = 3 \cdot \sigma_i$ ,  $M_i$  – математичне очікування для відповідної осі.

Отримаємо еліпсоїд функціонування агрегату при виконанні технологічної операції (рис. 3)

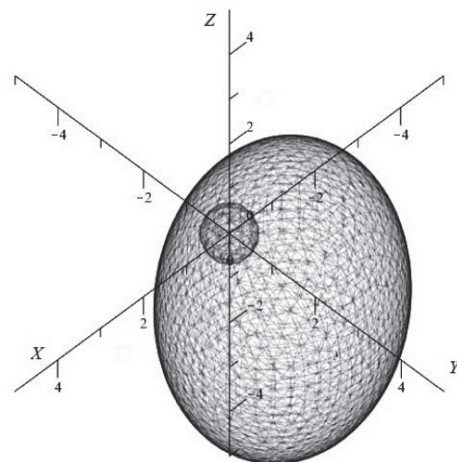


Рис. 3. Параметричний еліпсоїд функціонування МТА

Для встановлення напрямків оптимізації роботи МТА, що засновані на зменшенні додаткових енергетичних втрат енергії, необхідним є аналіз проєкцій повного

прискорення відносно діапазону  $T_{opt} = [-0,5; 0,5]$  апроксимованого сферою.

**Основна частина.** Вивчаючи властивості структур кінцевого характеру, таких як детермінований сигнал, отриманий експериментальним шляхом, а також нескінченних структур технологічної операції, що передбачають стрибкоподібність процесів в них або віддільність складових елементів, зручно застосувати елементи теорії множин.

У роботах [1 - 3] запропоновано для аналізу функціонування МТА застосовувати статистичну обробку і апроксимацію результатів експерименту поверхнею другого порядку, застосування даного алгоритму дозволить знизити витрати часу на проведення аналізу і суттєво підвищити ефективність, так як враховує втрати в трьох площинах і виявляє напрямки найбільших енергетичних втрат.

Область функціонування, апроксимацією вана еліпсоїдом, задається безліччю кінців радіус вектора повного прискорення встановленого з центру мас МТА  $\Phi_{\bar{a}} = \{\bar{a}_1, \bar{a}_2, \bar{a}_3, \dots, \bar{a}_n\}$ .

Потужність даної множини обмежується часом проведення експерименту  $t$  і частотою опитування вимірювального комплексу  $\Delta t$ ,  $|M| = N = t/\Delta t$ . З рис. 2 видно, що еліпсоїд містить простір не заповнений точками, однак при збільшенні  $N \rightarrow \infty$  весь обсяг заповнюється, хоча і має різну щільність розподілу точок. Таким чином, можна говорити про те, що між точками простору  $R^3$  і векторами прискорення агрегата встановлена взаємно однозначна відповідність  $\Phi_{\bar{a}} \mapsto R^3$ .

На основі статистичного аналізу встановимо обмеження множини:

зверху

$$\uparrow \Phi_{\bar{a}} \stackrel{def}{=} \exists! \bar{a}_{\max} : \bar{a}_{\max} \geq \forall \bar{a}_n \in \Phi_{\bar{a}}; \quad (2)$$

і знизу

$$\downarrow \Phi_{\bar{a}} \stackrel{def}{=} \exists! \bar{a}_{\min} : \bar{a}_{\min} \leq \forall \bar{a}_n \in \Phi_{\bar{a}}; \quad (3)$$

Для впорядкованої множини  $\Phi_{\bar{a}}$  супремум  $s_{\Phi} = \sup \Phi_{\bar{a}} \in \Phi_{\bar{a}} = \min \bar{a}_{\max}$ , а інфімум  $i_{\Phi} = \inf \Phi_{\bar{a}} \in \Phi_{\bar{a}} = \max \bar{a}_{\min} = -\bar{a}_{\max} + M_{\bar{a}}$ .

Зважаючи на те що вектор  $\bar{a}$  можна розкласти за трьома компонентами некомпланарних напрямків  $(i, j, k)$ , запишемо:

$$\bar{a}_{\max} = a_{x_{\max}} \vee a_{y_{\max}} \vee a_{z_{\max}}, \quad (4)$$

З рис. 2 видно, що сфера мінімальних відхилень прискорення, є підмножиною множини  $\Phi_{\bar{a}}$  –

$T_{opt} \subset \Phi_{\bar{a}}$ :

$$T_{opt} = \{\forall \bar{a}_n \in \Phi_{\bar{a}} | \bar{a}_n \leq \text{sgn} 0,5\}, \quad (5)$$

для якого точною верхньою і нижньою гранями є:

$$s_T = \sup T_{opt} \in T_{opt} = i_T = \inf T_{opt} \in T_{opt} = \text{sgn} 0,5, \quad (6)$$

Підмножина  $P$  є доповненням  $T_{opt}$  до універсума  $\Phi_{\bar{a}}$ :

$$P = T_{opt} \wedge \Phi_{\bar{a}} = \{ \forall \bar{a}_n \in \Phi_{\bar{a}} | (s_T < \bar{a}_n \leq s_{\Phi}) \wedge (i_T < \bar{a}_n \leq i_{\Phi}) \}, \quad (7)$$

Відповідні супремум та інфімум підмножини:

$$s_P = \sup P \in P = s_{\Phi}, \quad (8)$$

$$i_P = \inf P \notin P = s_T, \quad (9)$$

Множина  $T_{opt}$  є ядром еліпсоїда, а його питома вага критерієм оцінки режиму функціонування. Визначити його можливо на основі статистичної обробки:

$$p_T = \frac{n_t}{N}, \quad (10)$$

де  $n_t$  – число значень прискорення, які належать множині  $\bar{a}_n \in T_{opt}$  згідно статистичної обробки.

Однак статистичний аналіз зручно проводити над проєкціями прискорення, тому і питому вагу ядра також краще визначити для кожної з осей. Це дозволить визначити, в якому напрямку обумовлені максимальні втрати енергії, і виявити методи їх зниження.

Так як сферична форма ядра з центром на початку координат розглянута як ідеальний випадок, до якого ми наближаємося, то при статистичній обробці ядро може змінювати своє положення в середині еліпсоїда рис. 4.

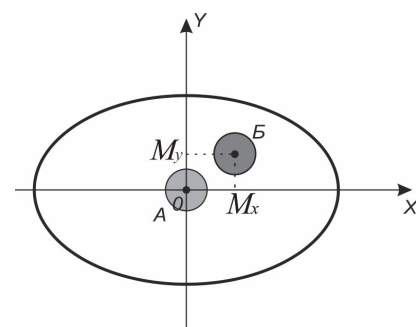


Рис. 4. Положення ядра в об'ємі еліпсоїда.

Це пов'язано з тим, що центр еліпсоїда задається математичними очікуваннями  $(M_x, M_y, M_z)$ , які в більшості випадків відмінні від нульових значень.

Далі слід розрізнити нормальне (рис. 4.А) і дійсне (рис. 4.Б) ядро, для ідеального випадку вони збігаються. Відхилення положення дійсного ядра викликані обраним режимом роботи, характером технологічної операції, компонованням МТА, умовами роботи (рельєф, фізико-механічні властивості ґрунту і т.д.).

Слід визначити напрямки, в яких зміщення ядра можливо допустити. Значення проєкцій на вісь ординат задається характером технологічної операції: силами, що викликають бічний увід; частотою коригування траєкторії руху; застосуванням машин змінної маси і т.д. При відсутності можливості усунути зміщення ядра, таке допускається для певної технологічної операції і заданого МТА при порівняльних дослідженнях.

Найбільший вплив на значення проєкції прискорення на вісь абсцис надає рельєф агрофона, як макро так і мікро нерівності мають стохастичний характер з цього зміщення ядра для даної осі допускається, однак на величину не більшу, ніж  $M_z$ .

Будь-яке зміщення ядра щодо початку координат уздовж осі абсцис задасть постійне збільшення або зменшення швидкості, що буде характеризувати режиму руху, як перехідний. В рамках даної роботи такі режими не розглядаються, тому зміщення по осі абсцис не допускається.

Запишемо рівняння (5) для дійсного ядра з урахуванням (4):

$$T'_{opt} = \left\{ \forall \bar{a}_n \in \Phi_{\bar{a}} \left( i_T < a_{xn} \leq s_T \right) \wedge \left( M_y - 0,5 < a_{yn} \leq M_y + 0,5 \right) \wedge \left( M_z - 0,5 < a_{zn} \leq M_z + 0,5 \right) \right\} \quad (11)$$

Як підсумок можна стверджувати, що для кожної технологічної операції буде своя допустима область (рис. 5), що обмежує максимальний зсув дійсного ядра, для визначення якої на даний момент недостатньо статистичної інформації.

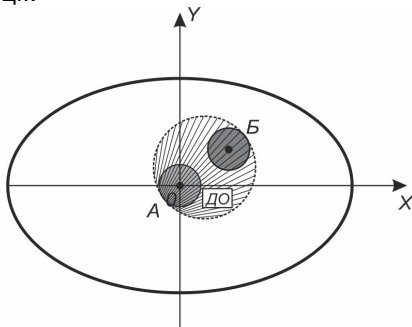


Рисунок 5. Допустима область зсуву ядра еліпсоїда.

Однак аналогічно пошуку «хорошого» еліпсоїда, можливо, знайти раціональний режим ро-

боти МТА, який за інших рівних буде охарактеризований меншими втратами енергії і підвищенням якості виконання технологічної операції.

Початковим питанням, на яке необхідно відповісти є допустимий діапазон зміни параметрів, що відповідають за ефективність виконання технологічної операції (далі початкові умови).

Розглянемо спрощений варіант зі швидкістю руху, визначеної згідно агротехнічним вимогам, і відомим МТА.

Реалізувати необхідну швидкість для будь-якого трактора можна на декількох передачах трансмісії при можливості використання часткових швидкісних режимів роботи двигуна. Вибір раціонального режиму за класичними методиками в цьому випадку зводиться до визначення мінімальної витрати палива і максимального завантаження двигуна. Ґрунтуючись на запропонованому методі аналізу функціонування МТА можливо визначити раціональний режим без втрати якості за менший проміжок часу.

Для реалізації методу необхідно дотримуватися алгоритму аналізу. Припустимо, згідно до початкових умов допускається робота МТА на  $k$  різних режимах.

Спочатку для всіх режимів вибирається допустима область зміщення дійсного ядра, з умовою мінімального віддалення від нормального  $T'_{opt} \rightarrow T_{opt}$  (рис. 6).

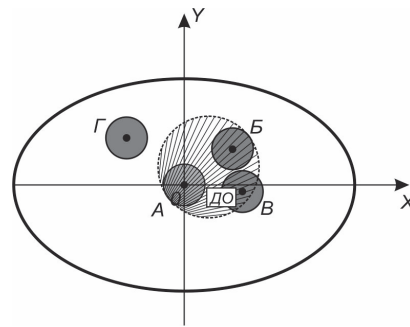


Рис. 6. Відсіювання режимів з недопустимим зсувом дійсного ядра.

Для прискорення аналізу відсіюються ті, що не відповідають даній області (рис. 6. В, Г). Допустима область будується відповідно системі рівнянь:

$$\begin{cases} x = \frac{1}{2} \bar{M}_{kx} + \left( \left( \frac{1}{2} \bar{M}_{kx} \cdot \cos \alpha_x \right) + 0,5 \right) \cdot \sin \psi \cdot \cos \varphi, \\ y = \frac{1}{2} \bar{M}_{ky} + \left( \left( \frac{1}{2} \bar{M}_{ky} \cdot \cos \beta_y \right) + 0,5 \right) \cdot \sin \psi \cdot \sin \varphi, \\ z = \frac{1}{2} \bar{M}_{kz} + \left( \left( \frac{1}{2} \bar{M}_{kz} \cdot \cos \gamma_z \right) + 0,5 \right) \cdot \cos \psi, \end{cases} \quad (12)$$



де  $\bar{M}_{kx}$ ,  $\bar{M}_{ky}$ ,  $\bar{M}_{kz}$  – середнє значення математичного очікування проєкцій прискорення, серії експериментів  $k$ .

Для реалізації алгоритму запишемо область у вигляді множини  $DO$ :

$$DO = \left\{ \forall \bar{a}_n \in \Phi_{\bar{a}} | E_0(x_0, y_0, z_0) = \left( \frac{1}{2} \bar{M}_{kx}, \frac{1}{2} \bar{M}_{ky}, \frac{1}{2} \bar{M}_{kz} \right) \wedge \wedge \Delta_{0n} \leq \frac{\sqrt{\bar{M}_{kx}^2 + \bar{M}_{ky}^2 + \bar{M}_{kz}^2}}{2} + 0,5 \right\}. \quad (13)$$

Далі для решти, будуємо еліпсоїд функціонування і відбираємо режими з найменшим об'ємом  $vol(E_k) \rightarrow \min$ :

$$vol(E_k) = \iiint_T \begin{cases} x = M_x + (a_{x\max} - M_x) \cdot \sin \psi \cos \varphi, \\ y = M_y + (a_{y\max} - M_y) \cdot \sin \psi \sin \varphi, \\ z = M_z + (a_{z\max} - M_z) \cdot \cos \varphi. \end{cases} \quad (14)$$

Отримавши режими з найменшими об'ємами необхідно визначити ті, у яких розподіл  $\bar{a}_n \in \Phi_{\bar{a}}$  підпорядковується наступній умові:

$$\forall \bar{a}_n \in T'_{opt} \geq \forall \bar{a}_n \in P. \quad (15)$$

Режим з найбільшою питомою вагою  $p_T$ , є найкращим для серії, що аналізується.

Слід зазначити, що в разі виявлення кількох режимів, питома вага яких рівна  $p_{T1} \approx p_{T2} \approx p_{Tn}$ . Пріоритетом у виборі користується режим з мінімальним зсувом дійсного ядра. Визначити, такий можна використовуючи множину  $DO$ , задану за формулою (13) побудувавши її для кожного з режимів.

Мінімальна за об'ємом допустима область характеризує найкращий режим. Однак, аналізуючи роботу даного алгоритму, виявлені виключення, які можливо застосувати при різній важливості параметрів, що задають початкові умови.

Основним питанням для застосування винятків є ступінь впливу коливань миттєвої швидкості на якість виконання технологічної операції. Якщо агротехнологічними вимогами встановле-

но допустиме  $\Delta V_{d\max}$  і її зниження не завдасть істотного впливу на якість виконання, то визначити «хороший режим» можна по питомій вазі ядра режимів, що аналізуються, які відповідають умові:

$$i_\phi < \frac{V_{d\max}}{dt} < s_\phi. \quad (16)$$

Режим з найбільшою питомою вагою буде найкращим з енергозбереження.

Якщо ж зниження  $\Delta V_{d\max}$  є пріоритетним завданням тоді необхідно вибрати режим з мінімальним  $vol(E_k)$  і знехтувати умовою (15) даного алгоритму.

**Висновки.** Запропонований алгоритм дозволить суттєво прискорити аналіз експериментальних даних та вибрати режим найбільш близький до оптимального, враховуючи як елементи класичної методики, так і динамічні характеристики МТА. Врахування додаткових втрат енергії та напрямки їх зниження відкривають нові перспективи для підвищення ефективності використання МТА при виконанні технологічних операцій рослинництва.

#### Література.

1. Шуляк М.Л. Оцінка функціонування сільськогосподарського агрегату за динамічними критеріями / М.Л. Шуляк, А.Т. Лебедев, М.П. Артьомов, Є.І. Калінін // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів – 2016. – № 4. – С. 218 - 226.
2. Подригало М.А. Оценка дополнительных энергетических потерь при установившемся режиме движения транспортно тяговых машин / М.А. Подригало, Н.П. Артемов, Д.В. Абрамов, М.Л. Шуляк // Механіка та машинобудування «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – Вип. 9. – С. 98 - 107.
3. Шуляк М.Л. Область функціонування машино-тракторного агрегату, що апроксимована поверхнею другого порядку / М.Л. Шуляк // Технічні науки: зб. наук. праць ВНАУ. – Вінниця: ВНАУ, 2016. – Вип. 1(93), т. 1. – С. 28 - 31.

#### Аннотация

### Выбор рационального режима МТА на основе анализа эллипсоида функционирования

М.Л. Шуляк

Необходимость проведения оценки функционирования МТА является одной из важных задач современной науки. С большой вероятностью можно утверждать, что, как тяговая концепция трактора, так и методы оценки тягово-динамических и экономических свойство требуют изменений в условиях современного тракторостроения. Особую актуальность эти вопросы приобретают при оценке тяговых

параметров иностранных тракторов большой энергонасыщенности. Обычные тяговые испытания не дают возможности оценить потенциальные возможности тракторов, поэтому реализовать мощность двигателя через движители энергонасыщенного трактора очень трудно.

Установившийся режим движения сопровождается появлением продольных линейных ускорений, вызывают колебания линейной скорости машины, относительно своего среднего значения. Предложено рассмотреть постоянное движение МТА, как последовательность разгонов и замедлен. Анализ направления вектора полного ускорения позволяет утверждать, что любые отклонения этого вектора от осей ординат и аппликат вызывают вредную работу и потерю энергии. В зависимости от знака проекции, работа вдоль направления движения является дополнительной потерей энергии, и в то же время условием динамического равновесия. Условием динамического равновесия является равенство по модулю отрицательных и положительных проекций вектора на ось абсцисс.

Для выбора оптимального режима работы МТА необходимо оценивать динамические потери при установившемся движении, возникающие вследствие колебаний действительной скорости движения. В статье приведен анализ направления вектора полного ускорения МТА и установлено, что любые отклонения этого вектора от осей ординат и аппликату вызывают потерю энергии. Предложен метод анализа режимов работы, опирающийся на оценке объема области функционирования и относительной частоты распределения проекций ускорения относительно ядра поверхности второго порядка. Предложенный принцип анализа работы МТА позволит быстро определить оптимальный режим и предложить меры направленные на снижение потерь энергии.

**Ключевые слова:** ускорение трактора, тягово-динамические свойства, экспериментальные исследования, вектор ускорения.

## Abstract

### Selecting the efficient mode of MTU by analyzing the functioning of ellipsoid

M.L. Shulyak

Necessary evaluating of functioning MTA is one of important tasks of modern science. The traction concept of the tractor and evaluation methods of traction and dynamic and economic properties will be changed in the conditions of modern tractor construction. This can be approved with a high probability. These questions acquire special relevance in case of assessment of tractive parameters of foreign tractors of a large power intensity. Normal tractive tests don't give the chance to evaluate potential opportunities of tractors. Therefore it is very difficult to realize engine capacity by means of propulsions unit of the power saturated tractor.

The set mode of movement is followed by appearance of longitudinal linear accelerations which cause oscillations of the line speed of the machine. It occurs concerning the mean value. It has been offered to consider constant movement of MTA as the sequence of accelerations and decelerations. Any deviations of this vector from ordinate axes and z-coordinates cause harmful operation and loss of energy. The analysis of the direction vector of full acceleration depending on a sign of a projection allows to claim that operation along the direction of movement is additional loss of energy and a condition of a dynamic equilibrium. A condition of a dynamic equilibrium is equality on the module of the negative and positive projections of a vector to an abscissa axis.

For a choice of an optimum operation mode of MTA it is necessary to estimate dynamic losses in case of the set movement which arise owing to oscillations of the actual speed of movement. The analysis of the direction vector of full acceleration of MTA has been provided in article. It was set that any deviations of this vector from ordinate axes and z-coordinate cause energy loss. The method of the analysis operation modes which is based on assessment of volume of functioning area and the relative frequency of distribution projections of an acceleration surface kernel of the second order has been offered. The offered principle of the analysis of operation MTA will allow to define quickly the optimum mode and to propose measures the energies directed to lowering of losses.

**Keywords:** acceleration of the tractor, traction and dynamic properties, experimental research, vector of acceleration.

Представлено від редакції: А.Т. Лебедєв / Presented on editorial: A.T. Lebedjev

Рецензент: Р.В. Антощенко / Reviewer: R.V. Antoshhenkov

Подано до редакції / Received: 03.10.2016